

Abgrenzung von Bestandesschichten mithilfe eines bivariaten Gaußschen Mischverteilungsmodells

Kai Staupendahl

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt

Zusammenfassung

Die Aufteilung von vertikal stark strukturierten Beständen in Bestandesschichten ist ein wesentliches Element der qualitativen und quantitativen Zustandsbeschreibung und erlaubt eine differenzierte Analyse von Subpopulationen mit unterschiedlicher Wachstumsdynamik und waldbaulicher Bedeutung. Sie erfolgt im Fall von ertragskundlichen Versuchsflächen meist anhand der Klasseneinteilungen nach Kraft oder nach den Vorgaben des Verbandes der Deutschen Forstlichen Versuchsanstalten. Hier wird ein Ansatz zur Schichtentrennung vorgestellt, der auf der Anpassung einer bivariaten Gaußschen Mischverteilung an die gemeinsame Verteilung der gemessenen Baumdurchmesser und -höhen eines Bestandes beruht. Die Mischverteilung besteht dabei, je nach auszuscheidender Schichtenanzahl n , aus mindestens zwei normalen Teilverteilungen mit jeweils relativem Anteil p_i und $\sum_{i=1}^n p_i = 1$. Die Zugehörigkeit eines Baumes zu einer der Schichten entscheidet sich dann anhand der Teilverteilung, deren anteilgewichtete Dichte für die gegebene Kombination aus Durchmesser und Höhe den größten Wert aufweist. Vorteile dieses Ansatzes liegen insbesondere im Fehlen der subjektiven Komponente der auf gutachterlichen Baumklassenzuordnungen beruhenden Schichtansprache, in der quantitativen Berücksichtigung der Struktur des gesamten Bestandes bei der Zuordnung jedes Einzelbaumes und der Möglichkeit der nachträglichen Ausweisung von Schichten auch für Versuchsflächenaufnahmen ohne Schichtansprache. Der Vortrag erläutert die methodischen Besonderheiten, insbesondere im Hinblick auf Bäume ohne Höhenmessung, illustriert anhand von Beispielen die Unterschiede zur gutachterlichen Schichtentrennung und beschreibt die Grenzen des Verfahrens.

Einleitung

Die Einteilung von vertikal strukturierten Beständen in Bestandesschichten ist ein wesentliches Element der qualitativen und quantitativen Zustandsbeschreibung und erlaubt eine differenzierte Analyse von Subpopulationen mit unterschiedlicher Wachstumsdynamik und waldbaulicher Bedeutung. Die Definition der Schichten variiert allerdings je nach Zweck und Anlass.

In der Bundeswaldinventur z. B. orientiert sich die Schichteneinteilung mit möglichst objektivierbaren und weniger von gutachterlichen Einschätzungen abhängigen Unterscheidungskriterien insbesondere an Inventuraspekten (BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ 2011 S. 43). In der Forsteinrichtung hingegen stehen v. a. die waldbaulichen Funktionen der Schichten im Vordergrund. So wird z. B. In den Niedersächsischen Landesforsten zwischen Hauptbestand (auf ihm liegt das wirtschaftliche Schwergewicht), Nachwuchs (bildet den überschirmten Folgebestand), Unterstand (überschirmte Schicht mit ausschließlich dienender Funktion) und Überhalt (Reste aus dem Vorbestand über dem Hauptbestand mit $B^\circ \leq 0,3$) unterschieden (NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN 1987). Im Fall von ertragskundlichen Versuchsflächen erfolgt die Schichteneinteilung üblicherweise anhand der Baumklassen nach KRAFT (1884) oder gemäß der „Anleitung zur Ausführung von Durchforstungsversuchen des Verbandes der Deutschen Forstlichen Versuchsanstalten (VDFV) von 1902 (WIMMENAUER 1902). Im Versuchswesen der Nordwestdeutschen

Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) werden bspw. alle vorherrschenden bis gering mitherrschenden Bäume nach Kraft oder alle herrschenden bis zurückbleibenden, aber noch schirmfreien Bäume nach VDFV (jeweils die Klassen 1-3) dem Oberstand zugeordnet. Wenn die Baumklassen beider Systeme angesprochen werden, zählen außerdem Bäume, die in die VDFV-Baumklasse 3 und die Kraft'sche Klasse 4a (beherrscht, aber im Wesentlichen noch schirmfrei) fallen, zum Oberstand. Bäume der verbleibenden Baumklassen(kombinationen) gehören dem Unterstand an, eine Differenzierung nach weiteren Schichten erfolgt nicht.

Nur am Rande sei angemerkt, dass die Verquickung von soziologischer Stellung und technischer Schaftgüte in den Baumklassendefinitionen des VDFV problematisch ist, da z. B. bei Bäumen der Klasse 2 (herrschend, aber mit abnormer Kronenentwicklung oder schlechter Stammform) nachträglich nicht mehr feststellbar ist, ob eine „abnorme Kronenentwicklung“, und damit ein biologischer Aspekt, oder eine „schlechte Stammform“, und damit ein technischer Aspekt, für die Einstufung maßgebend war (ASSMANN 1950 S. 378).

Aus dem bisher Gesagten lässt sich ableiten, dass es zahlreiche Definitionsvarianten gibt, von denen keine in jeder Situation eine eindeutige Schichtzuordnung aller Bäume erlaubt, da die gutachterliche Ansprache der zugrundeliegenden Baumklassenkriterien tlw. erheblichen Spielraum für subjektive Einschätzungen lässt (vgl. BURSCHEL u. HUSS 1997 S. 256). Dennoch sind Schichten für die Beschreibung von Waldbeständen hilfreich und wertvoll, da sie als abstraktes Konstrukt helfen, die z. T. große Komplexität von Waldstrukturen auf ein nützliches und für den jeweiligen Zweck brauchbares Maß zu reduzieren. Im kybernetischen Sinne können sie somit auch als Komplexitätsverminderer verstanden werden (PÖRKSEN 2008 S. 224). Um subjektive Einflüsse zu minimieren, ist es in jedem Fall sinnvoll, möglichst eng gefasste und operationale Kriterien zu entwickeln.

Hinsichtlich der quantitativen Beschreibung von Waldbeständen zeigt Abbildung 1 die Bedeutung einer nach Schichten differenzierten Auswertung. Ohne diese sind ertragskundliche Kennwerte wie der Durchmesser und damit auch die Höhe des Grundflächenmittelstamms in mehrschichtigen Beständen mit bi- oder multimodaler Verteilung der Einzelbaumdimensionen wenig aussagefähig.

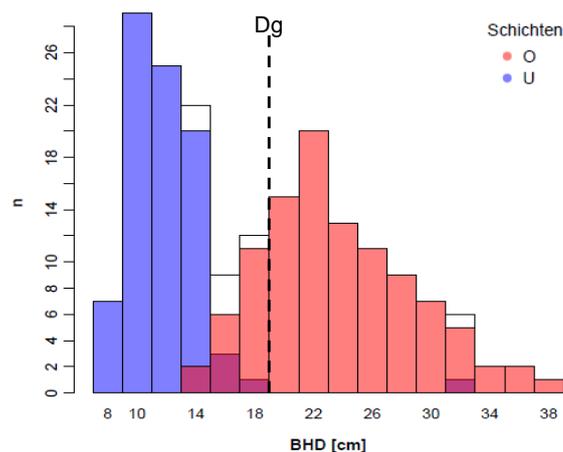


Abbildung 1: Verteilung der Brusthöhendurchmesser eines 56-jährigen, zweischichtigen Roteichen-Bestands in einer Versuchsparzelle der NW-FVA im Niedersächsischen Forstamt Harsefeld. Die Teilverteilung des Oberstands ist in roter, die des Unterstands in blauer Farbe dargestellt. Die gestrichelte vertikale Linie zeigt die Lage des Durchmessers des Grundflächenmittelstamms des Gesamtbestands.

Weiterhin zeigen an den Gesamtbestand einer Baumart angepasste Höhenkurven bei mehrschichtigem Bestandaufbau, der bei hochdurchforsteten und schattenertragenden Baumarten auch bei Gleichaltrigkeit vorkommen kann, oft eine unbefriedigende Anpassung an die Messdaten, wie Abbil-

dung 2 verdeutlicht. Im dort dargestellten bereits erwähnten Roteichenbestand führt dies im Übergangsbereich von Unter- und Oberstand zu einer Überschätzung der Höhen der Bäume im Unter- und einer Unterschätzung der Höhen der Bäume im Oberstand. Besonders kritisch ist allerdings die Überschätzung der Oberhöhe, da dies auch zu einer Überschätzung der Bonität führt.

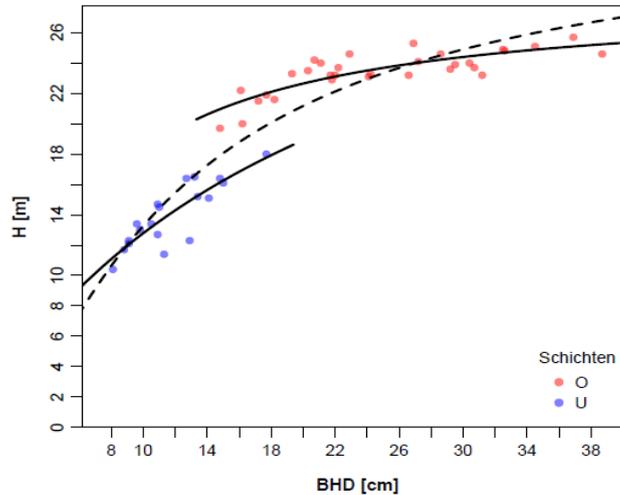


Abbildung 2: Brusthöhendurchmesser-Höhen-Werte des in Abb. 1 beschriebenen zweischichtigen Roteichen-Bestands. Die gestrichelte Linie zeigt die an alle Höhenmessdaten angepasste Höhenkurve, die durchgezogenen Linien die an die Messdaten des Oberstands (rot) und Unterstands (blau) angepassten Höhenkurven. Als Höhenkurvenmodell diente die Funktion: $H = e^{\alpha + \beta/BHD}$

Anlass für die hier angestellten Überlegungen war die Erkenntnis, dass bisher v. a. in älteren Versuchen der NW-FVA nicht immer eine Schichtansprache der Bäume erfolgte, und zwar auch dort, wo es aufgrund der Bestandesstrukturen wünschenswert gewesen wäre. Hinzu kommt eine z. T. recht heterogene Ansprache der Schichten zwischen verschiedenen Aufnahmen bzw. Aufnahmeteams. Eine konsequente und systematische Berücksichtigung in Modellen und Auswertungen ist somit nur bedingt möglich.

Methoden

Ausgangspunkt der Überlegungen zu einer Lösung dieses Problems war die Arbeit von ZUCCHINI et al. (2001), in der die Anwendung eines Mischungsmodells mit zwei bivariaten Normalverteilungen zur Beschreibung der BHD-Höhen-Verteilung im ungleichaltrigen Buchenreinbestand des Naturwaldreservats Dreyberg (Solling) demonstriert wird. Die Datengrundlage hierfür bildete eine Vollaufnahme mit 1242 erfassten Bäumen mit Messung aller Baumhöhen. Es ergab sich somit die Frage, ob dieser Ansatz auch zur Identifizierung der Schichten in ertragskundlichen Versuchsflächen mit unvollständigen Höhenmessungen geeignet ist.

Auf dieser Basis wurde ein zweistufiges Verfahren entwickelt, bei dem in einem ersten Schritt eine bivariate Gaußsche Mischverteilung (*gaussian mixture model*, kurz: GMM) der BHD und Höhen mit zwei Komponenten (für Unter- und Oberstand) und 11 Parametern an die zu analysierenden Daten angepasst wird. Die Gesamtverteilung von BHD und Höhen wird somit durch eine Mischung von zwei bivariaten, normalen Teilverteilungen mit den Anteilen p_O und p_U ($p_O + p_U = 1$) beschrieben. Zur Abbildung von mehr als zwei Schichten könnte die Mischverteilung natürlich auch aus mehr als zwei Komponenten bestehen. Im zweiten Schritt wird die Dichte jedes BHD-Höhen-Paares in beiden Teilverteilungen bestimmt. Der zugehörige Baum gehört dann der Teilverteilung (Schicht) mit dem höheren anteilgewichteten Dichtewert an. Abbildung 3 zeigt ein Beispiel für die Ergebnisse dieses Prozesses.

Wie schon erwähnt besteht bei den Versuchsfeldern das Problem der unvollständigen Höhenmessungen. Auf der Basis von Höhenkurven ergänzte Höhen können nicht verwendet werden, da dies die Varianz reduzieren und damit zu einer verzerrten Parameterschätzung führen würde. Auch eine Anpassung der Mischverteilung nur an die Höhenmessbäume birgt, je nach deren Auswahl, das Risiko von Verzerrungen und wäre ineffizient, da die vollständig vorhandenen Durchmesserinformationen nur teilweise genutzt würden. Eine Lösung bietet die Funktion `FitGMM` des R-Package *MGMM (Missingness Aware Gaussian Mixture Models)*; McCaw et al. 2022), die für die iterative Parameterschätzung den *Expectation-Conditional-Maximization-Algorithmus* nutzt, eine Weiterentwicklung des *Expectation-Maximization-Algorithmus*. Die Erwartungswerte der fehlenden Höhen werden dabei nach der Schätzung der Verteilungsparameter geschätzt (*posterior expectations*) und beeinflussen diese somit nicht.

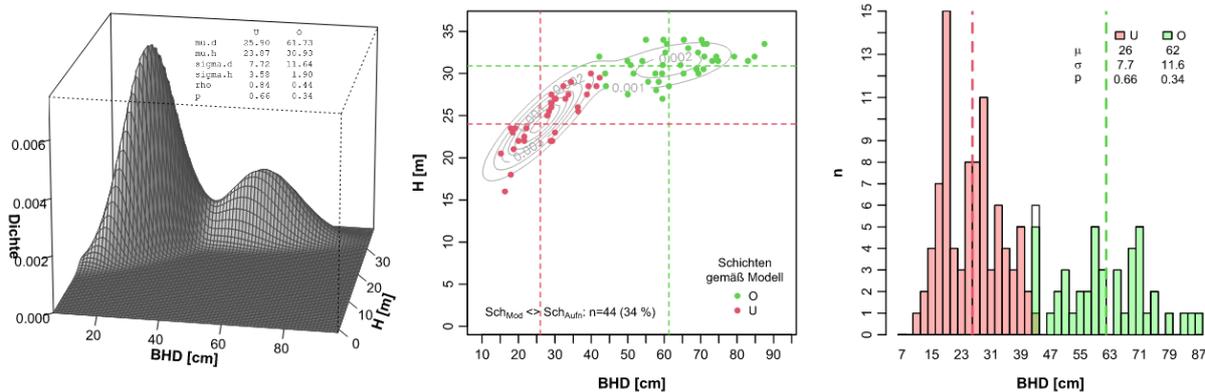


Abbildung 3: 3D- und Kontur-Plot der geschätzten bivariaten Mischverteilungsdichte (links und Mitte) und Durchmesserverteilung (rechts) eines seit 1902 beobachteten 175-jährigen Stieleichen-Bestandes in Schleswig-Holstein („Siemens-Eichen“) mit 139-jähriger Rot- und Hainbuche im Unterstand. Die BHD-Höhen-Paare bzw. Histogramme der Schichten sind gemäß der modellierten Schichtzuordnung in roter (Oberstand) bzw. grüner Farbe (Unterstand) dargestellt.

Die Anzahl n der Komponenten der Mischverteilung muss der Funktion `FitGMM` vorgegeben werden, so dass vorab durch gutachtliche Beurteilung zu entscheiden ist, wieviel Schichten für die Beschreibung des Bestandaufbaus benötigt werden. Bei einer automatisierten Verarbeitung einer großen Zahl von Versuchen und Aufnahmen ist hier natürlich nur eine generelle Festlegung möglich, die z. B. in jungen Beständen, in denen sich noch gar keine Schichten ausbilden konnten, dazu führen würde, dass eine inadäquate Aufteilung in die vorgegebene Anzahl an Schichten erzwungen wird. Um diese Fälle abzufangen, wurden für verschiedene, die BHD- und Höhenverteilung beschreibende Parameter (z. B. Spannweiten, Schiefemaße, Tests auf Multimodalität) Grenzwerte festgelegt, unterhalb derer eine Aufteilung in Schichten unterbleibt oder anhand einfacher und konservativer Regeln erfolgt (z. B. „alle Bäume mit Höhen, die mehr als 10 m niedriger sind als die Oberhöhe, sind Unterstand“).

Ergebnisse

Die oben beschriebene Methode wurde auf die BHD-Höhen-Daten aller Aufnahmen aller Versuche der NW-FVA angewendet und die resultierende Schichteneinteilung wurde mit der im Bestand gemäß Aufnahmeanweisung durchgeführten Schichtenzuordnung verglichen. Die Unterschiede waren oft nur gering, teilweise aber auch erheblich, wobei die modellierte Schichtentrennung oft plausibler erscheint. Naturgemäß waren die Ergebnisse umso uneindeutiger, je weniger die Schichtenbildung vorangeschritten war bzw. je mehr sie sich, z. B. durch Einwuchs des Unterstands in den Oberstand, wieder zurückgebildet hatte. Die Abbildungen 4 bis 6 zeigen einige Beispiele.

Abbildung 6 zeigt deutlich, dass möglichst gleichmäßig über den gesamten Durchmesserbereich verteilte Höhenmessungen auch für die Anpassung der bivariate Mischverteilung wichtig sind und diese stabilisieren. In der nächsten Aufnahme dieser Parzelle war dies dann auch der Fall und die modellbasierte Schichteneinteilung dementsprechend besser an die bimodale Form der BHD-Verteilung angepasst.

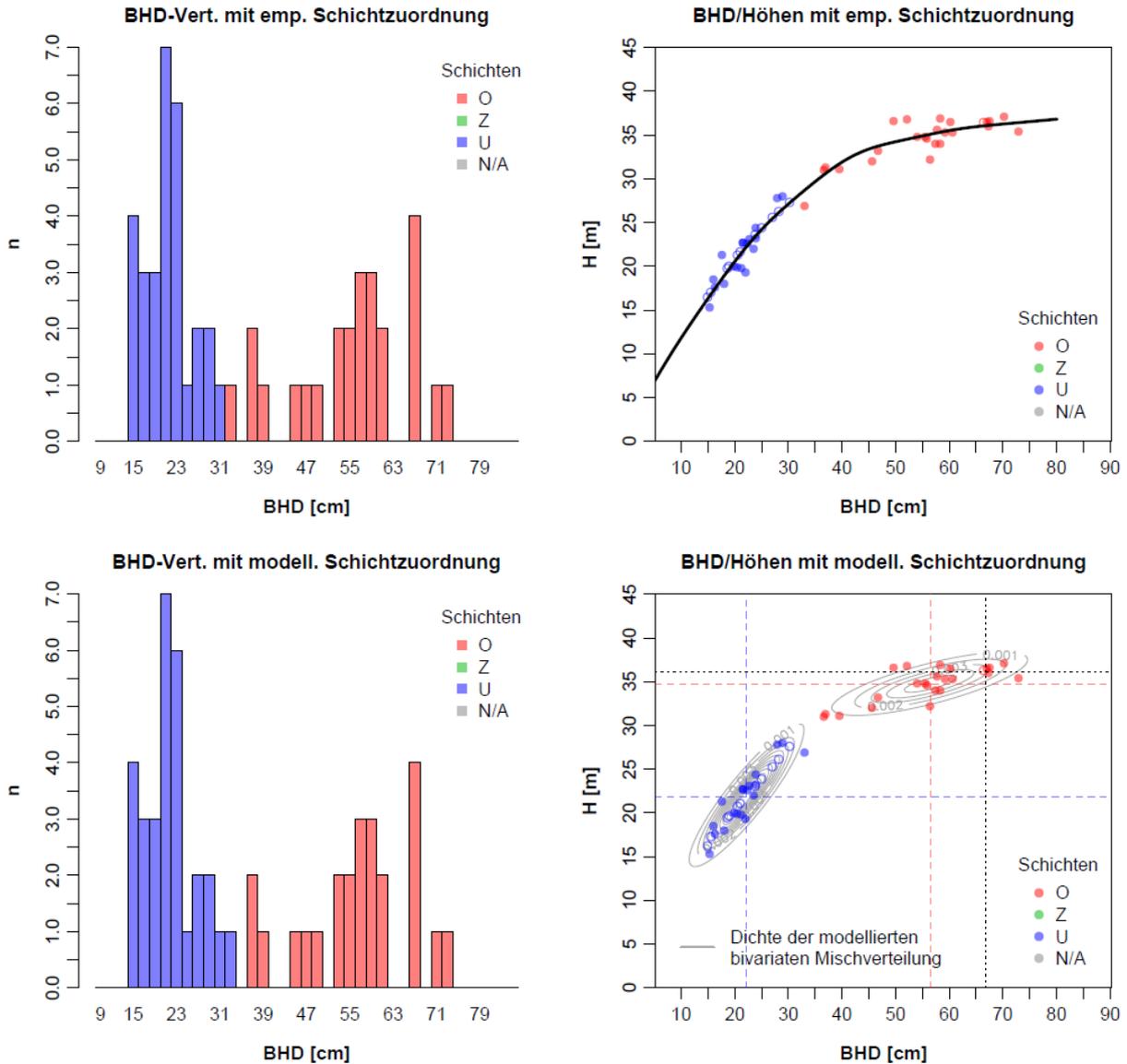


Abbildung 4: BHD-Verteilung (links) und BHD-Höhen-Daten (rechts) der Parzelle 1 des Versuchs SHLF 726j: Stark hochdurchforstete 111-jährige Rotbuche. Oben ist die empirische Schichteneinteilung durch den Außendienst, unten die modellbasierte Schichtentrennung dargestellt (Oberstand rot, Unterstand blau). Die nicht ausgefüllten Punkte in den BHD-Höhen-Diagrammen stellen oben die durch die Standardroutinen der NW-FVA über Höhenkurven und unten die durch den Algorithmus ergänzten Höhen dar.

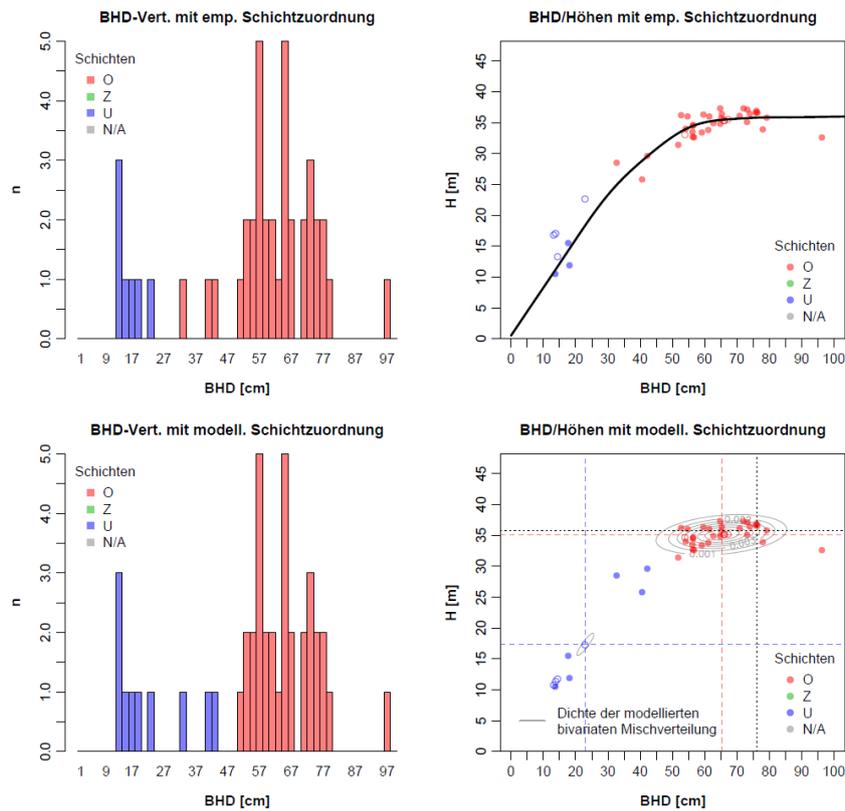


Abbildung 5: Darstellung nach demselben Schema wie in Abb. 4 für Parzelle 11 des Versuchs Lauterberg 225j1: Stark niederdurchforstete 80-jährige Douglasie und Fichte im Ober- und 35-jährige Fichte und Thuja im Unterstand.

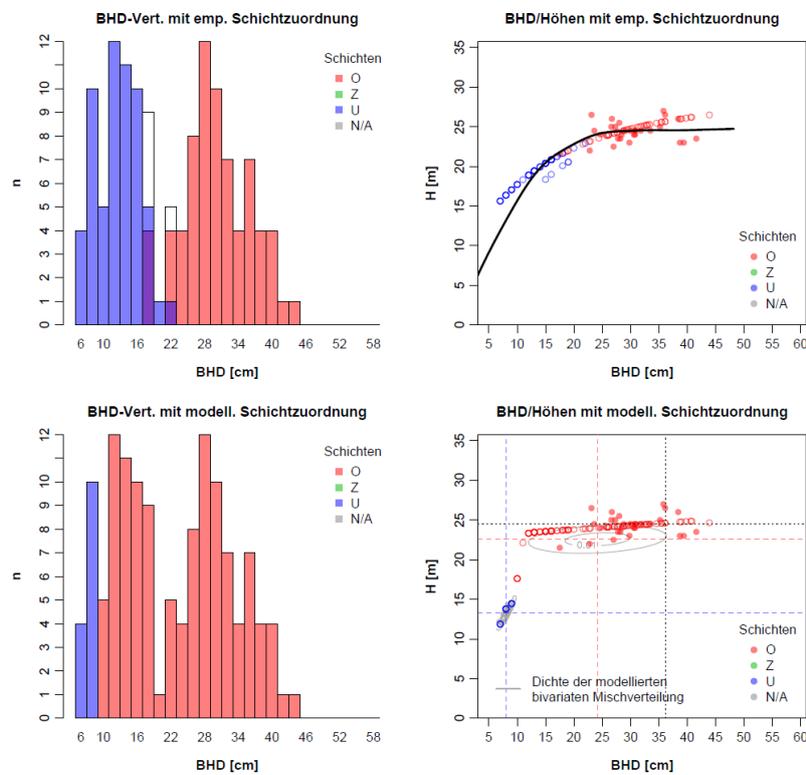


Abbildung 6: Darstellung nach demselben Schema wie in Abb. 4 für Parzelle 1 des Versuchs Göhrde 157j: Mäßig hochdurchforstete 93-jährige Rotbuche und Stieleiche.

Fazit

Das hier vorgestellte Verfahren ermöglicht bei eindeutiger Zweischichtigkeit eine sehr robuste und plausible Schichtenerkennung. Im Vergleich mit der gutachterlichen Schichtzuordnung ergeben sich jedoch tendenziell höhere Anteile des Unterstands. Dies war auch durchaus zu erwarten, da im modellbasierten Ansatz die bivariate Verteilung der Höhen und Durchmesser maßgeblich ist, während sich die auf der Baumklassenansprache basierende empirische Schichtentrennung fast ausschließlich an den Baumhöhen orientiert (von qualitativen Aspekten abgesehen). Ob diese Änderung wünschenswert ist, hängt vom verfolgten Zweck ab und davon, ob das Zuwachsverhalten der abweichend zugeordneten Bäume eher dem im Unter- oder im Oberstand entspricht; sofern das Ziel darin besteht, bezüglich dieses Merkmals möglichst homogene Teilpopulationen zu bilden.

Schwieriger gestaltet sich die modellbasierte Abgrenzung der Bestandesschichten bei fließenden Übergängen von der Ein- zur Zweischichtigkeit (oder umgekehrt), wie sie sich in jüngeren Beständen oder beim Einwachsen von Unterstand in obere Kronenschichten zeigen. Hier sind zusätzliche Regeln erforderlich. Auch dreischichtige Bestände sind gut darstellbar, die Anzahl der auszuweisenden Schichten muss allerdings vorher gutachterlich bestimmt werden.

Die größte Stärke des Verfahrens liegt sicher darin, dass es ein einheitliches Vorgehen mit einem objektiven Algorithmus ermöglicht, der - abgesehen von der Vorgabe der auszuweisenden Schichten - subjektive Aspekte der Schichtentrennung ausschaltet. Ein weiterer Vorteil ist die bei der Zuordnung jedes Einzelbaumes ermöglichte quantitative Berücksichtigung der Gesamtstruktur des Bestandes, während bei der gutachterlichen Schichtenansprache die jeweils lokale Umgebung des gerade betrachteten Baums ein viel höheres Gewicht hat. Und schließlich eröffnet das Verfahren die Möglichkeit der nachträglichen Ausweisung von Schichten auch für alte Versuchsflächen und Aufnahmen, so dass für entsprechende Fragestellungen eine deutlich umfangreichere Datenbasis zur Verfügung steht. Allerdings kann es in Aufnahmezeitreihen von Versuchsflächen (z. B. aufgrund unterschiedlicher Kollektive der Höhenmessbäume) zu Sprüngen bei der Verteilungsanpassung und damit der Schichteneinteilung kommen. Deshalb ist für die Zukunft die Entwicklung einer Methode zur Glättung der Verteilungsparameter über dem Aufnahmejahr geplant. Anschließend sollen alle Methoden in einem R-Package gekapselt und veröffentlicht werden.

Literaturverzeichnis

- ASSMANN, E. (1950): Die Buchenhochdurchforstungsversuche der ehemaligen Preußischen Versuchsanstalt. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 69: 373–421.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (2011): *Aufnahmeanweisung für die dritte Bundeswaldinventur (2011-2012)*, 2. geänderte Auflage. Bonn. 107 S.
- BURSCHEL, P.; HUSS, J. (1997): *Grundriss des Waldbaus: ein Leitfaden für Studium und Praxis*. Parey, Berlin. 487 S.
- KRAFT, G. (1884): *Beiträge zur Lehre von Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben*. Kindsworth's Verlag, Hannover. 147 S.
- MCCAW, Z.R.; ASCHARD, H.; JULIENNE, H. (2022): Fitting Gaussian mixture models on incomplete data. *BMC Bioinformatics* 23(1): 208. <https://doi.org/10.1186/s12859-022-04740-9>
- NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (1987): *Anweisung zur Betriebsregelung (Forsteinrichtung) in den Niedersächsischen Landesforsten (B.A.87)*. Hannover. 33 S.
- PÖRKSEN, B. (2008): *Die Gewissheit der Ungewissheit. Gespräche zum Konstruktivismus*. Carl-Auer-Systeme Verlag, Heidelberg. 237 S.

WIMMENAUER, K. (1902): Die diesjährige Versammlung des Verbandes der Deutschen Forstlichen Versuchsanstalten. Beilage: Anleitung zur Ausführung von Durchforstungs- und Lichtungsversuchen. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 78(25): 180–184.

ZUCCHINI, W.; SCHMIDT, M.; GADOW, K. VON (2001): A model for the diameter-height distribution in an uneven-aged beech forest and a method to assess the fit of such models. Silva Fennica 35(2).